

論文

[1107] 横波弾性波のスペクトルによる凍結融解劣化の定量的評価

上杉 真平*1・大津 政康*2・福本 進也*3・門司 唱*4

1. はじめに

一般にコンクリートが凍結融解作用を受けると、コンクリート内部の空隙に含まれている水分が凍結することにより膨張し、反対に融解時には収縮して、その繰り返しの組織の劣化が進行していくことが知られており、この劣化の材料的メカニズムについてはこれまでに多くの研究がなされている[1], [2]。しかし、凍結融解作用による劣化の問題を扱うには、劣化機構解明と同時にその程度を正しく評価することが構造物の維持管理、補修の上で重要であり、いくつかの方法が提案されている[3], [4], [5]。

ところで、非破壊検査法の一つに弾性波スペクトロスコピー法と呼ばれるものがある。これは、透過波の周波数特性を調べることにより個体内部の状況を調べようとするもので、不均質な対象物に対しても大変有効であることが知られている[6]。

本研究は、凍結融解作用を受けたコンクリートの初期の段階での表面からの劣化程度を評価するために横波弾性波によるスペクトロスコピー法を用い、この問題への適用の可能性について基礎的な考察を行ったものである。

2. スweepモード入力によるスペクトロスコピー法の原理

スペクトロスコピーとは、超音波法で計測される波動の周波数領域での特性を利用して、材料内部の状況を推定しようとするもので、この場合、周波数成分の変化が主な対象となる。すなわち、材料中を伝播する弾性波は、伝播経路の諸状況によって反射、屈折、回折、散乱、減衰などを生じ、透過前後において波動形態に変化をもたらすことから、検出波の周波数特性を分析して透過波に含まれる材料内部に関する情報を取り出すことにより、その状況を非破壊的に評価することができる。

ここでは、応答スペクトルの検出に一般的なFFT法を用いずに、計測の容易さと現場への適応性を考慮してスweepモード入力によっている。この基本的な考え方は、ある応答関数をフーリエ級数展開した場合の各周波数成分の振幅がフーリエスペクトルの振幅に対応することを原理としており、その計測システムを理論的に示すと次のようになる。

いま、入力波 $f(t)$ による出力波を $g(t)$ 、試験体の応答関数を $w(t)$ とし、それぞれをフーリエ変換して得られる伝達関数を $F(f)$ 、 $G(f)$ および $W(f)$ で表すものとする時、出力関数は次の様な時間領域での合成積で表される。

$$g(t)=w(t)*f(t) \quad (1)$$

*1 熊本工業大学講師 工学部土木工学科、学博（正会員）

*2 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

*3 熊本大学大学院 工学研究科

*4 熊本工業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

式(1)をフーリエ変換すると、

$$w(t)*f(t) \rightarrow W(f)F(f) \quad , \quad g(t) \rightarrow G(f) \quad (2)$$

となるので、式(1)は周波数領域において次のようなスカラー積に変換される。

$$G(F) = W(f)F(f) \quad (3)$$

ここで、入力波が振幅一定で任意の周波数の周期関数 $f(t) = \exp(i2\pi ft)$ として与えられる場合を考えると、 $F(f) = \text{const.}$ となるので、次のような関係式が導かれる。

$$g(t) = w(t)*\exp(i2\pi ft) \rightarrow G(f) = W(f)F(f) \equiv W(f) \quad (4)$$

衝撃力のフーリエ変換は全ての周波数帯でスペクトル振幅が一定となることを考慮すれば、式(4)は、衝撃力に対する応答関数のスペクトルは振幅一定の周期関数を入力したときの応答スペクトルに一致し、且つ、検出される応答スペクトルは試験体の応答関数のスペクトルと等価となることを意味している。これより、FFT法により検出波のスペクトルを計算する代わりに、個々の周波数成分をもつ周期関数入力（スイープモード入力）に対する応答振幅を周波数領域で描いたものを求めても問題がないことがわかる。これまでの実験においても、FFT法により求められたスペクトルとスイープモード入力法によって得られた応答スペクトルが良く一致していることが認められている[7]

3. 実験方法[8]

実験では、表-1に示すような配合で4種類のコンクリート角柱試験体（10×10×40cm）を作成した。なお、表中の空気量およびスランプは打設時における実測値である。また、養生は標準養生（20℃）とし、恒温槽に材令28日まで保存した。

凍結融解による劣化促進は土木学会基準（水中凍結融解試験）に準じて行い、凍結融解の1サイクルにおける最高及び最低温度は4℃～-18℃に設定し、その所要時間は3時間とした。

表-1 コンクリート試験体の配合及び力学特性値

	unit weight (kgf/m ³)				air (%)	slump (cm)	compressive strength (kgf/cm ²)	Young's modulus (kgf/cm ²)	Poisson's ratio
	W	C	S	G					
T1	174	455	684	1107	0.7	8	457.7	3.57×10 ⁵	0.20
T2	144	375	578	1211	3.6	4	447.9	3.04×10 ⁵	0.20
T3	174	370	746	1118	1.1	9	413.7	3.13×10 ⁵	0.20
T4	162	334	801	1008	5.6	7	386.9	2.86×10 ⁵	0.19

注) 目標スランプ値：8 cm，目標空気量：0及び5%

スペクトロスコピー試験法の概要図を図-1に示す。試験体表面に10cmの間隔をとって入出力センサ（横波用超音波振動子）を配置し、入出力センサを結ぶ線と直角方向に振動させる入力センサを介して1~100 kHzまで連続的に変化する電圧一定のSine波を入力させ（スイープモード入力）、出力センサで検出した波形の検出信号の実効値電圧をレコーダに直接記録させて応答スペクトルを求めた。ここで横波を用いた理由は、BEM

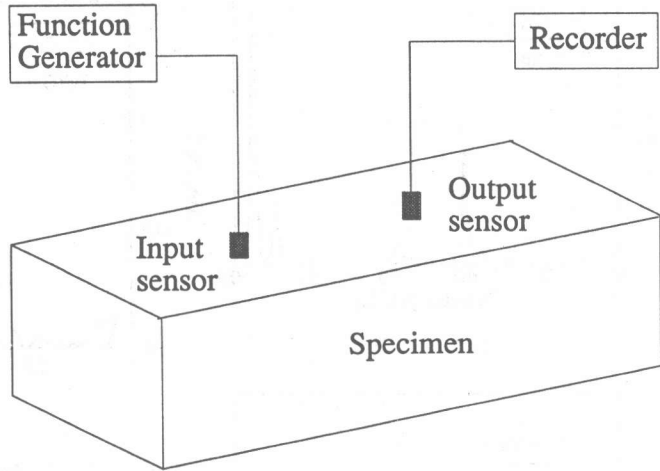


図-1 応答スペクトル計測システム

Mによる解析の容易さと、厚さ方向に劣化が進展する場合を対象としているため、この情報を横波が抽出し易いと考えられる点に注目したからである。

促進劣化による試験体の変化については、52,127および163 サイクル毎に動弾性係数および応答スペクトルを計測し、0 サイクル時の値と比較した。

4. 実験結果および考察

計測によって得られたコンクリート試験体T4の応答スペクトルを図-2に示す。健全な状態（0 サイクル時）の応答スペクトルをみると、0~100 kHzの間に5 個程度の主要な卓越（ピーク）が存在している。これらのピークは、52,127および163 サイクルと劣化が進行するに従って低周波数側へ僅かずつ移動しており、ピークと劣化度の間に何らかの関係があることが予測される。この応答スペクトルに現れるピークは、劣化した表層を持つ部材の共振周波数に対応しているものと考え、SH波による2次元面外波動問題とみなして境界要素法（BEM）と有限要素法（FEM）を結合したモデルにより動的応答解析を行った[9],[10]。解析においては、健全部と劣化部の弾性係数相対比 E_d/E_0 を一定（=0.1）と仮定し、FEMでモデル化した表面からの劣化層厚 d を0.5および1.0cmと変化させて、各周波数入力に対する検出点の応答振幅を計算した結果が図-3である。数値解析の際にとった周波数刻みが粗いことと2次元問題とみなして解析したことを考慮すれば、そのピーク出現傾向は実験結果をよく表現しており、表層の劣化が進行するに従ってピーク周波数値も低下していることがわかる。

以上の結果から、凍結融解による劣化現象を表層部の剛性低下として特徴づけるものとするれば、表面剛性の低下に起因するピーク周波数値の変化と劣化度の間には高い相関のあることが確かめられた。そこで、最初に現れるピークから順に第1, 2, ..., 5 ピークと呼ぶことにすると、第3 ピーク以降のものは出現傾向が不安定で一定の性状を示していない。他の試験体（T1~T3）についても同様の傾向がみられたことから、ピーク周波数値と劣化度（凍結融解サイクル）の相関を調べるために、劣化の進行に係わらず一定値を示すピーク周波数値 F_0 （ここでは第1 ピークの周波数値）と劣化の影響を受けるピーク周波数値 F_n （第2 ピークの周波数値）に着

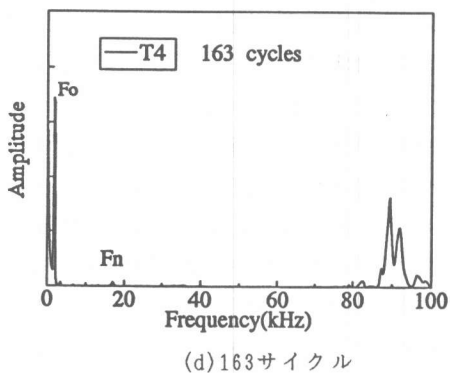
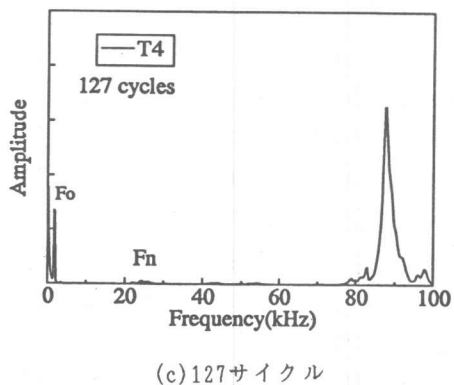
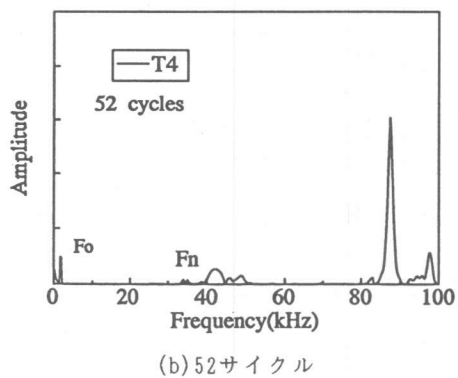
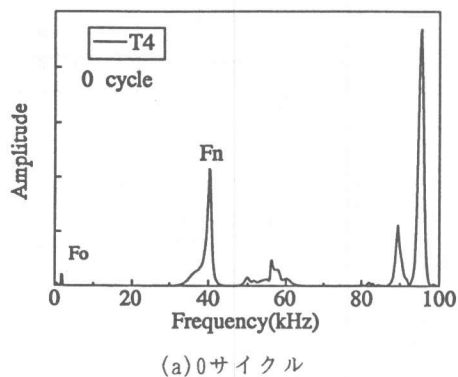


図-2 応答スペクトル(実測値)

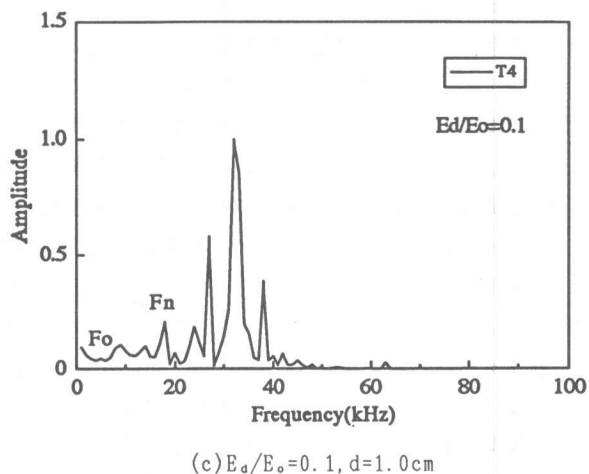
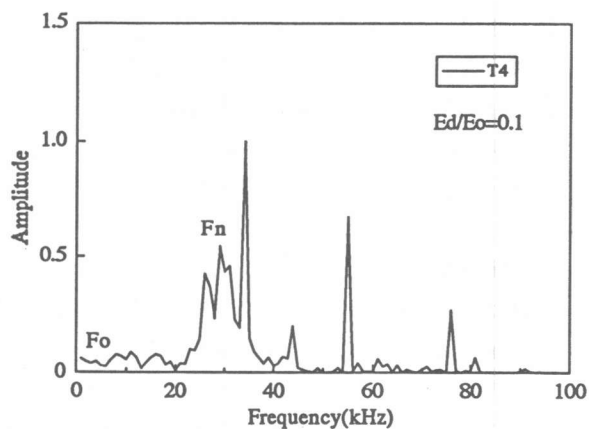
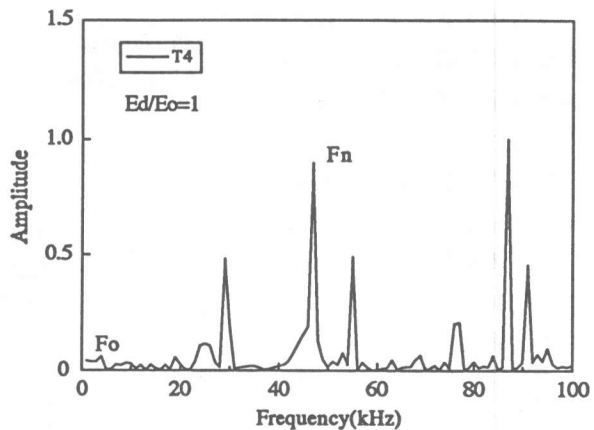


図-3 応答スペクトル(計算値)

目し、その周波数比 F_n/F_0 を求めて各サイクル毎に計算した相対動弾性係数と比較した。この結果をまとめたものが図-4および図-5である。

水セメント比や空気量の違いによる差はあるものの、図-4に示すようにピーク周波数比 F_n/F_0 と劣化サイクルの関係 (Calibration Curve) は、試験体T1及びT3については劣化による損傷が激しいために高次のサイクルについて計測をすることができなかったものの、一般に用いられる配合の試験体T2, T4についてはほぼ線形で、凍結融解のサイクルが増すにつれてピーク周波数値が小さくなっており、表層部の劣化を直接表す指標として比較の対象とするのは適切でないかもしれないが、相対動弾性係数の示す性状とも一致している。さらに、堀らの研究[4]によれば、コンクリート内に存在する細孔の体積変化と相対動弾性係数の低下との間には線形の関係が成立するという報告もあることから、応答スペクトルの

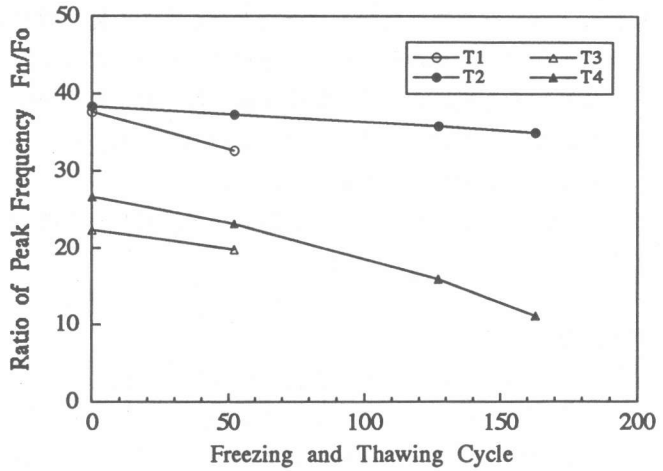


図-4 ピーク周波数比

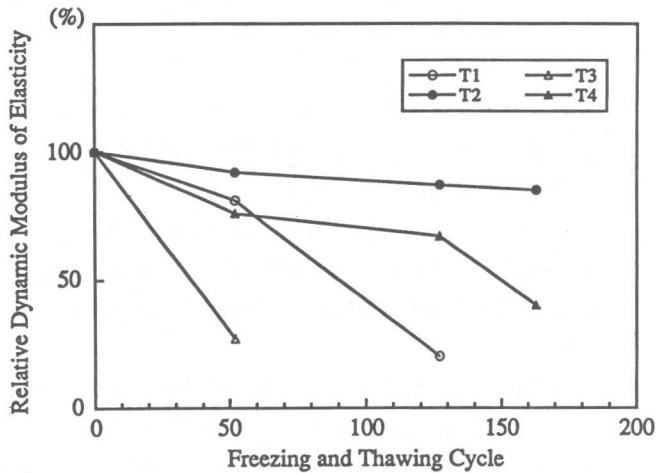


図-5 相対動弾性係数

ピーク周波数比から表層部の変化を推定することが可能ではないかと考えられる。

5. 結論

横波弾性波スペクトロスコピー法を凍結融解作用を受けたコンクリート試験体の劣化度評価に用い、その適用性について基礎的な検討を行った。ここで得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 弾性波スペクトロスコピー法によって得られた応答スペクトルに現れるピークは表層の劣化程度に依存しており、このピーク周波数値は劣化の進行 (劣化サイクル) に伴って変化するので、適切に選定したピークの変化を調べることによって求められる Calibration Curveから劣化度を推定することが可能である。

(2)実験から得られた横波弾性波の応答スペクトルがSH波による2次元面外波動場のBEM解析によって理論的に検証されたことから、この種の問題が半無限領域における2次元面外問題として比較的容易に扱えることがわかった。これより、一般に巨大な規模をもつコンクリート構造物の現場における劣化度評価において、横波弾性波を用いたスペクトロスコピー法の結果を理論的に検討できることが明らかになった。

(3)本手法を実用化するためには、各劣化サイクルにおける表面からの劣化深さとピーク周波数との関係を明確にすることと、最も代表的なピークの選定法を確立することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 長谷川寿夫・藤原忠司：凍害、技報堂、1988
- 2) 鎌田英治：セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害、コンクリート工学、Vol.19、No.11、pp.36-42、1981.11
- 3) 山下英俊・村上祐治・鈴木 篤・吉川弘道：凍結融解を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.1021-1026、1991.6
- 4) 堀 宗朗・多田浩治・齊藤 裕・三浦 尚：細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.723-728、1991.6
- 5) 齊藤 裕・氏家久芳・三浦 尚：針貫入によるコンクリート構造物の劣化診断に関する研究、第47回土木学会年次学術講演会講演概要集、V、pp.490-491、1992.9
- 6) 明石外世樹・尼崎省二：超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの品質評価、セメント・コンクリート、No.489、pp.23-30、1987.11
- 7) 坂田康徳・大津政康：超音波スペクトロスコピー法によるコンクリート部材中のひびわれおよび内部欠陥の定量的評価について、コンクリート工学論文集、Vol.3、No.1、pp.1-11 1992.1
- 8) 中川照久・上杉真平・大津政康：超音波スペクトロスコピー法によるRC部材のひびわれ検査法に関する考察、土木学会論文集、No.442/V-16、pp.53-60、1992.2
- 9) 上杉真平・大津政康：BEM-FEM結合法による2次元弾性定常波動場の解析、土木学会論文集、第398号、pp.295-301、1988.10
- 10) 上杉真平・中川照久・大津政康：弾性波スペクトロスコピー法によるひびわれの非破壊的評価に関するBEM解析、土木学会論文集、No.446/I-19、pp.197-203、1992.4